

ERGEBNISSE EXPERIMENTELLER STRUKTUR-UNTERSUCHUNGEN AN EINER ELASTISCH VERFORMBAREN DROOP-NOSE MIT FESTKÖRPERKINEMATIKEN

R. Keimer, S. Vasista, B. van de Kamp, J. Riemenschneider, H. P. Monner,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, (DLR), Institut für Faserverbundleichtbau und
Adaptronik, Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Für zukünftigen Luftverkehr ist die Steigerung der Effizienz ein wesentliches Ziel. Einen Beitrag zur Erreichung dieses Zieles können adaptive Strukturen sein, die sich während des Betriebes an geänderte Bedingungen anpassen, um so immer in einem optimalen Betriebspunkt zu sein.

Im Projekt NOVEMOR ("Novel Air Vehicle Configurations: from Fluttering Wings to Morphing Flight", FP7) wurde eine Droop-Nose an der Vorderkante der Flügelspitze eines Regional-Jets untersucht, die mit einer elastisch verformbaren Glasfaserhaut und Festkörperkinematiken zur Verformung und somit Anpassung an den Flugzustand ausgestattet wurde. Die Glasfaserhaut hat eine nicht konstante Dicke, die in einem 3D-Entwurfsprozess angepasst wird und hat als Schnittstelle zu den Kinematiken einen einzelnen L-Stringer. Die Kinematiken sind, um das Gewicht zu minimieren und Spiel zu verhindern, als Festkörperkinematiken ausgeführt, wobei aufgrund der hohen möglichen Dehnungen eine superelastische Nickel-Titanlegierung zur Anwendung kommt.

Das Auslegungsverfahren wird kurz vorgestellt und im Folgenden die verschiedenen experimentellen Untersuchungen kurz zusammengefasst. Die experimentellen Ergebnisse werden dargestellt und diskutiert und ihre Bedeutung für das Auslegungsverfahren von elastisch verformbaren Strukturen eingeordnet.

1. EINFÜHRUNG

Die Struktur, auf der die hier vorgestellten Untersuchungen beruhen, ist die Wingtip-Vorderkante eines Regionalflugzeuges (siehe BILD 1). Die Vorderkante des Wingtips wird als elastisch verformbare Droopnose ausgelegt, so dass eine Absenkung ermöglicht wird, die die Flügelanströmung beeinflusst. Ziel dieser Strömungsbeeinflussung durch Morphing ist es, die Effizienz im Flug über die gesamte Breite des Einsatzspektrums zu erhöhen.

Die Referenzgeometrie der untersuchten Struktur wurde vom Projektpartner Embraer geliefert und hat eine Spannweite von 1,3 m und ist stark verjüngt. Die Struktur ist als Bestandteil eines Full-Scale Windkanalmodells des Wingtips umgesetzt. Wie in BILD 2 zu sehen, besteht die Droopnose aus einer Haut mit einem L-Stringer, einem Holm und zwei Festkörperkinematiken (Compliant

Structures), die über Linearmotoren angesteuert werden. Die Verwendung von Festkörperkinematiken eröffnet das Potential Morphing mit hoher Effizienz und geringem Gewicht zu realisieren.

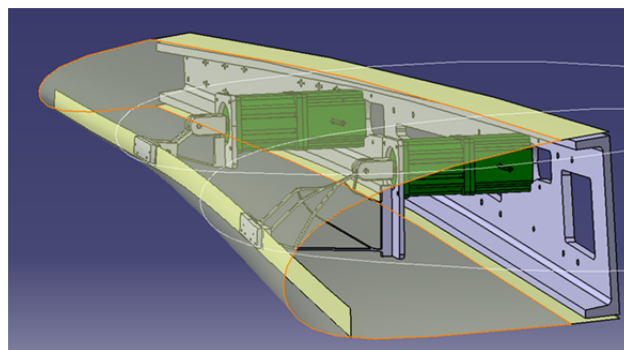


BILD 2: Konzept der Droopnose

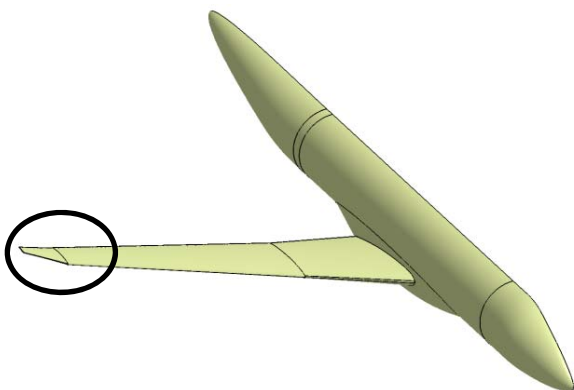


BILD 1: Wingtip

2. AUSLEGUNGSPROZESS

Der Auslegungsprozess ist im Wesentlichen eine Kette von Einzelprozessen, die nacheinander durchgeführt werden. Begonnen wird mit dem Entwurf der Faserverbundhaut. Eingangsgrößen für den Hautentwurf sind:

- 1) Zielgeometrien
- 2) Aerodynamische Lasten
- 3) Materialeigenschaften des Hautmaterials
- 4) Aktuatoreigenschaften

Ein Optimierungsverfahren [1,2] liefert mit den gegebenen Eingangsdaten einerseits die Vorgaben für den weiteren

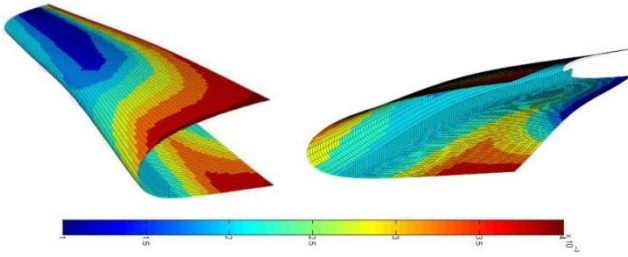


BILD 3: Dickenverteilung der Haut nach Auslegung

Fertigungsprozess der Haut, wie z.B. die Dickenverteilung und Faserorientierung der Haut (siehe BILD 3), als auch den Designraum für die daran anschließende Auslegung der Festkörperkinematiken. Dies sind im Wesentlichen:

- Anbindungspunkte der Kinematiken
- Zielverformung an den Anbindungspunkten der Festkörperkinematiken
- Steifigkeiten und Lasten aus der Haut

Diese Daten werden mit weiteren Eingangsgrößen:

- Materialeigenschaften der Festkörperkinematik
- Materialdicke der Festkörperkinematik
- Aktuatoreigenschaften
- Befestigungspunkt am Holm

einer Topologieoptimierung in 2D [1,3] zugefügt, die nach einem Postprocessing in dem fertigen Entwurf der Festkörperkinematiken mündet. Aufgrund der starken Verjüngung der Droopnose sind die Ergebnisse für die Inboard- und Outboard-Kinematiken sehr unterschiedlich.

Die Inboard-Kinematik ist aus einem superelastischen NiTi gefertigt mit der in BILD 4 gezeigten Form. Die Outboard-Kinematik ist aus Aluminium gefertigt und in BILD 5 gezeigt.

3. INSTRUMENTIERUNG DES MODELLS

Das Gesamtmodell ist mit Sensoren bestückt, die die Beobachtung während der verschiedenen Experimente ermöglichen. Sowohl die Haut, als auch die Festkörperkinematiken sind mit Dehnmessstreifen (DMS) bestückt, die an kritischen Positionen platziert sind.

BILD 4 zeigt die Positionen der DMS auf der Inboard-Festkörperkinematik. An jeder Position ist hier ein DMS platziert, die Beurteilung, ob es sich um Biege- oder Längsdehnung handelt, wird durch optische Auswertung ermöglicht. Die größten Dehnungen werden hier an Station IB1 erwartet.

In BILD 5 sind die beiden DMS-Positionen an der Outboard-Festkörperkinematik aufgezeigt. Durch die beidseitige Applikation können Biege- und Längsdehnungsanteile getrennt werden, da die DMS einzeln gemessen werden.

Auf der Innenseite der Haut sind insgesamt 6 DMS an 4 Messstellen positioniert (siehe BILD 6). Position A liegt auf der Profillinie der Inboard-Kinematik an der Stelle der größten zu erwartenden Krümmungsänderung, Messrichtung ist in Profilrichtung. Position B liegt seitlich neben dem Krafteinleitungspunkt und in Holmrichtung versetzt zur Inboard-Kinematik. Zwei DMS messen hier Verformungen parallel zur Kinematik (BL) und 90° dazu (BQ). Analog dazu sind zwei DMS an Position C neben

der Outboard-Kinematik platziert.

Zur Beobachtung der Festkörperkinematiken sind zwei Kameras eingebaut (BILD 7 zeigt die Inboard-Kamera, BILD 8 zeigt das Bild der Outboard-Kamera), die Live-Bilder liefern, um Verformungen beurteilen zu können.

An den Linearantrieben sind Potentiometer als Wegsensoren integriert. Dies ist notwendig, da die Linearschrittmotoren nur gesteuert werden und Schrittverluste unter Last auftreten könnten, die ohne Sensor unentdeckt blieben.

In die Droopnose sind 39 Druckmessbohrungen integriert, um im Windkanal Druckverteilungen zu messen (siehe BILD 9).

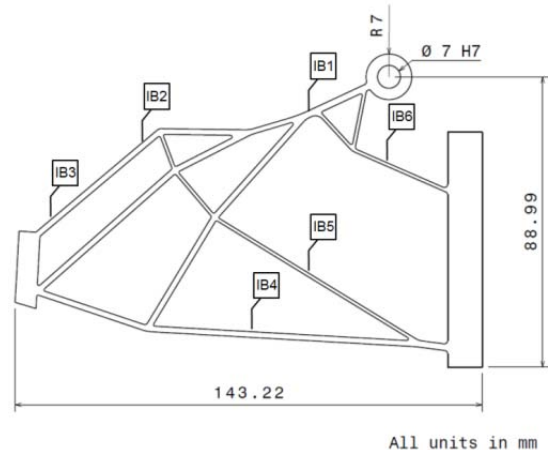


BILD 4: Inboard-Festkörperkinematik aus NiTi, mit 6 DMS-Applikationspunkten IB1 bis IB6

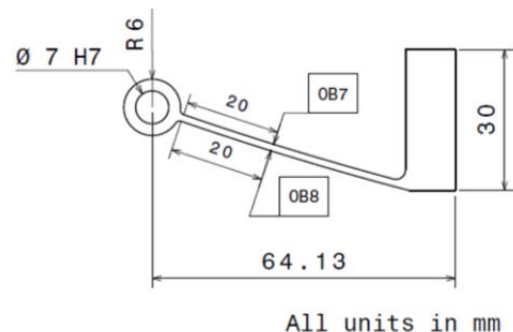


BILD 5: Outboard-Festkörperkinematik aus Aluminium mit 2 DMS-Applikationspunkten OB7 und OB8

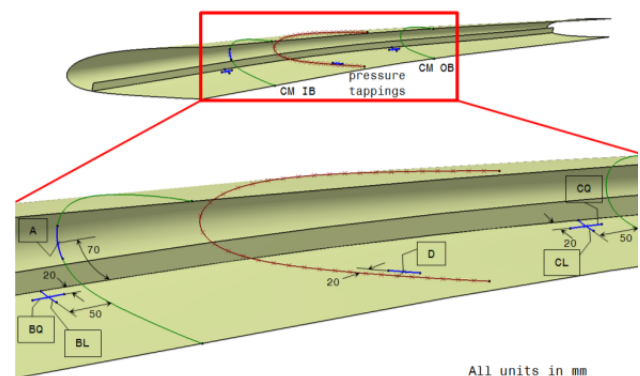


BILD 6: DMS-Applikationspunkte auf der Haut

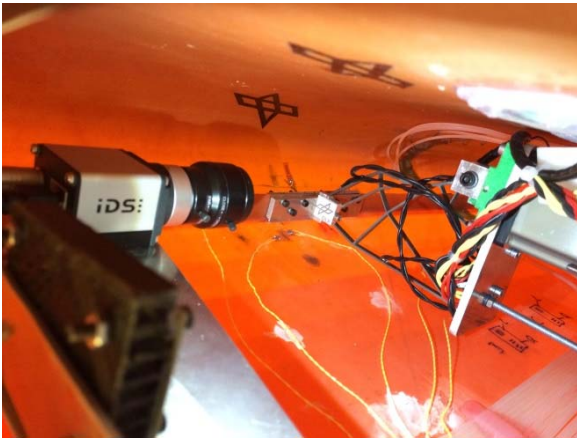


BILD 7: Kamera für Beobachtung der Inboard-Festkörperkinematik

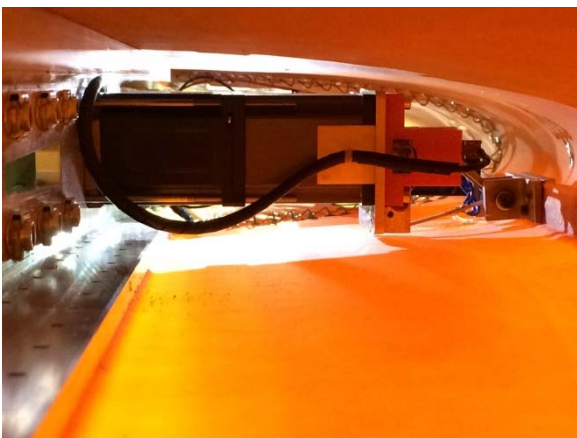


BILD 8: Kamera für Beobachtung der Outboard-Festkörperkinematik

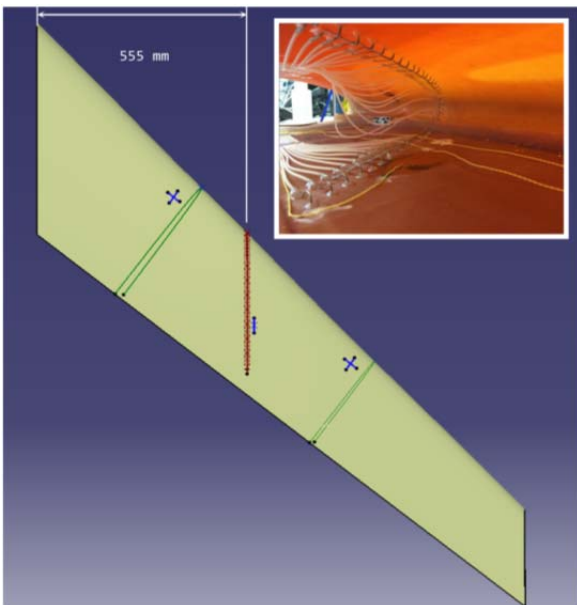


BILD 9: Druckmessbohrungen und ihre Position auf der Droopnose (in rot)

4. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

4.1. Labortest

In einem Labortest wird die Droopnose untersucht und ein erster Abgleich mit den Auslegungsdaten und den Berechnungen durchgeführt. Die Tests werden ohne aerodynamische Lasten durchgeführt und geben daher nur Informationen zum mechanischen Verhalten der Struktur unter den beim Morphingvorgang entstehenden Lasten.

4.1.1. Geometrievermessung der Oberfläche

Mit einem optischen 3D Scanner¹ wird die Droopnose bei 0% Droop und bei 100% Droop erfasst, das Ergebnis ist ein Geometrienetz, das die Oberfläche der Haut der Droopnose in einem messsystem-eigenen Koordinatensystem liefert. In einem Auswerteprogramm² kann das Netz in unterschiedliche Koordinatensysteme transformiert werden und auch mit Konstruktions- oder anderen Messdaten verglichen werden.

Die erste Auswertung vergleicht die vorgegebene CAD-Zielgeometrie der Droopnose bei 0% Droop mit der Geometrie der gebauten Struktur ebenfalls bei 0% Droop. BILD 10 und BILD 13 zeigen die entsprechenden Ergebnisse für die Ober- und die Unterseite der Droopnose. Angegeben ist jeweils die Amplitude des Abstands der gemessenen Oberfläche entlang der Flächennormale der CAD-Fläche, wobei die Normale von der Flügelinnenseite nach außen orientiert ist. Zuerkennen sind in BILD 13 leichte Beulen auf der Unterseite, die die Hautoberfläche stören. Aus der Kombination der beiden Bilder ist ersichtlich, dass die montierte Droopnose eine Absenkung von ca. 9 mm im Vergleich zu der konstruierten Zielgeometrie aufweist. Dies ist einerseits auf die Fertigung der Haut zurückzuführen, wo eine Eigenspannung des Faserverbundes bei dem recht komplizierten Aufbau nicht ausgeschlossen werden kann, zudem reagiert eine solche gewölbte Struktur auf minimale Abweichungen der Befestigungsbohrungen in Haut und Holm ebenfalls mit einer Formabweichung. Festzuhalten ist, dass Fertigungs- und Montageabweichungen in der gleichen Größenordnung wie die durch Morphing zu erzielende geforderte Verformung auftreten.

Um die Fertigungsungenauigkeiten aus der Bewertung der erzielten Verformung zu eliminieren, wird im nächsten Schritt, analog zum im letzten Abschnitt beschriebenen Vorgehen, der Abstand der vorgegebenen Zielgeometrie bei 100% Droop mit der ursprünglichen Zielgeometrie bei 0% Droop verglichen. BILD 11 und BILD 14 stellen das Ergebnis für Ober- und Unterseite der Droopnose dar. Eine Absenkung in der Größenordnung von 10 mm ist die Zielforderung.

BILD 12 und BILD 15 stellen die Abstände der gemessenen Konturen bei 0% Droop und 100% Droop dar. Zu erkennen ist, dass die Absenkung global in der Größenordnung von 6 mm liegt. Das Verformungsmuster weicht in Spannweitenrichtung zudem von dem in BILD 11 und BILD 14 ab, da zur Flügelspitze hin die Verformung noch geringer wird. Insgesamt ist die Absenkung real ca. 40% kleiner als die der Auslegung zugrundegelegte Verformung.

¹ ATOS Triple-Scan, Firma GOM

² GOM Inspect

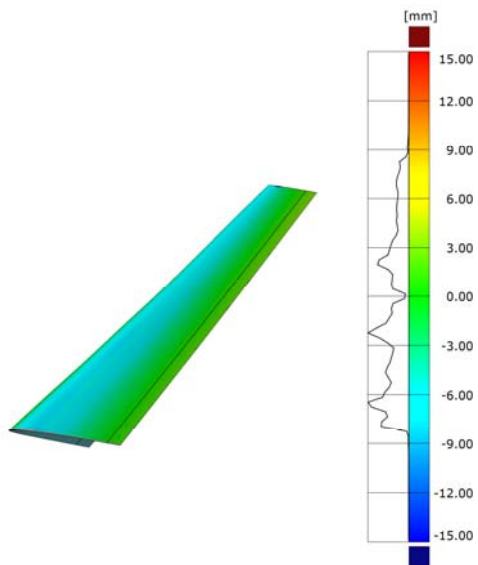


BILD 10: Differenz CAD zu Messung, 0% Droop, oben

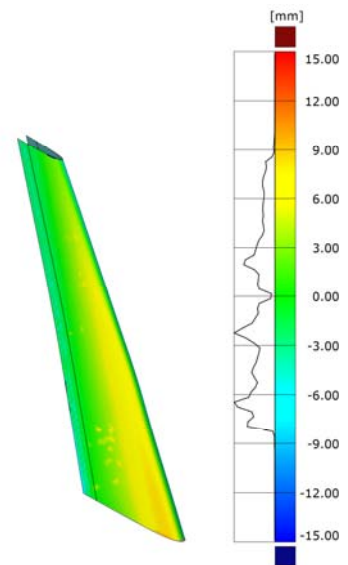


BILD 13: Differenz CAD zu Messung, 0% Droop, unten

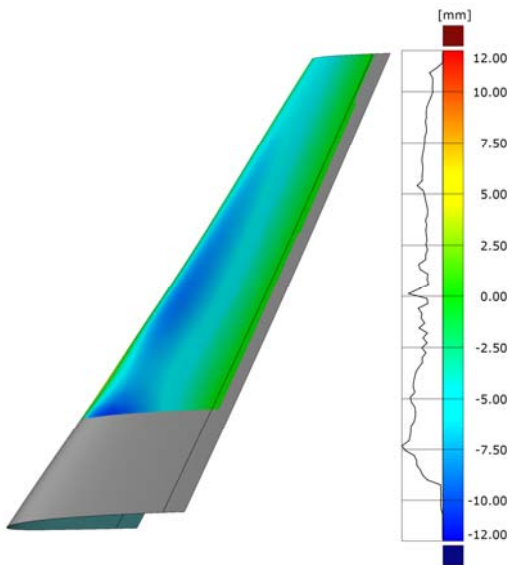


BILD 11: Differenz 0% zu 100% Droop (CAD), oben

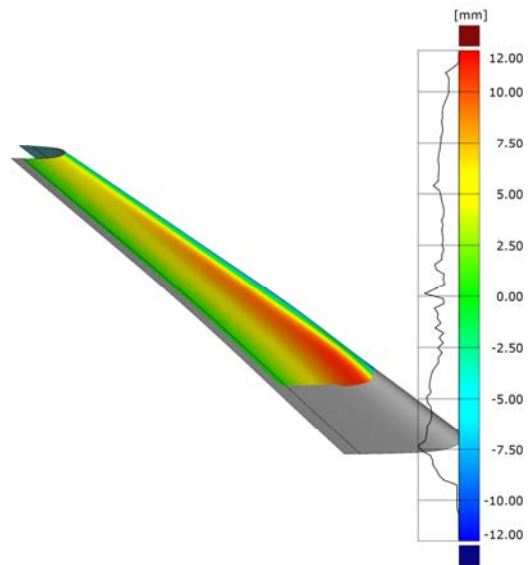


BILD 14: Differenz 0% zu 100% Droop (CAD), unten

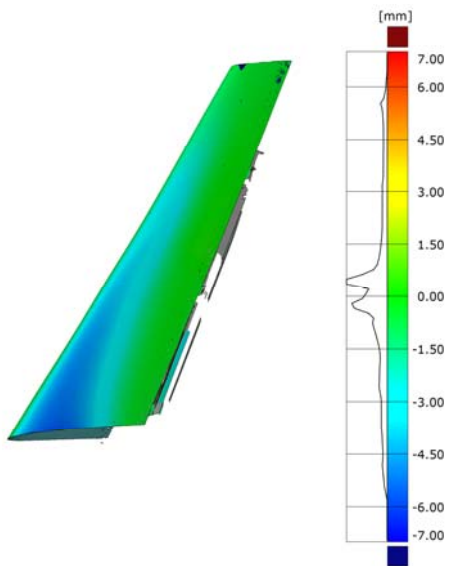


BILD 12: Differenz 0% zu 100% Droop (gemessen), oben

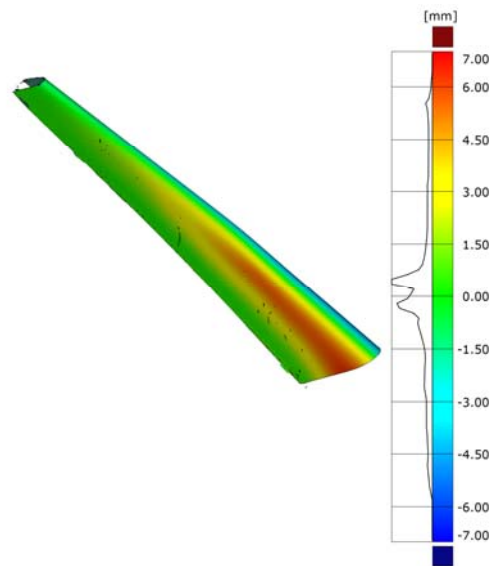


BILD 15: Differenz 0% zu 100% Droop (gemessen), unten

Ein Teil dieser geringeren Verformung ist darin zu suchen, dass die nach dem Auslegungsverfahren gebaute Struktur auch in der Simulation schon geringere Auslenkungen erzielt als die geforderten, da jeder Einzelschritt der Auslegung weitere Abweichungen in die Ergebnisse einbringt.

4.1.2. Verschiebungsmessung an den Antrieben und der Vorderkante

Begleitend zu den Messungen mit der instrumentierten Sensorik wird in einem Test die Absenkung von zwei Punkten auf Höhe der Festkörperkinematiken mit externen Lasertriangulationswegsensoren gemessen und den Auslenkungen der Antriebe gegenübergestellt. In BILD 16 sind die Werte der durch die externen Wegsensoren gemessenen Absenkungen über die durch die internen Auslenkungssensoren gemessene Aktuatorverschiebung dargestellt. Die Werte sind jeweils nach dem Anfahren eines diskreten Schrittes durch die Motorsteuerung erfasst, wobei die Sollschrötte 1 mm bei dem Inboard-Antrieb und 0,5 mm beim Outboardantrieb betragen. Es ist zu beobachten, dass die Absenkung für die Inboardstation weniger Abweichungen über der Aktuatorposition aufweist, als die der Outboardposition. Dies lässt auf Spiel an dieser Stelle schließen.

Ein weiteres Ergebnis dieser Messung ist, dass unter den Lasten während des Morphings die Linearschrittmotoren keine Schrittverluste aufweisen, da die Sollpositionen der Motorverschiebung in allen Messungen erreicht werden.

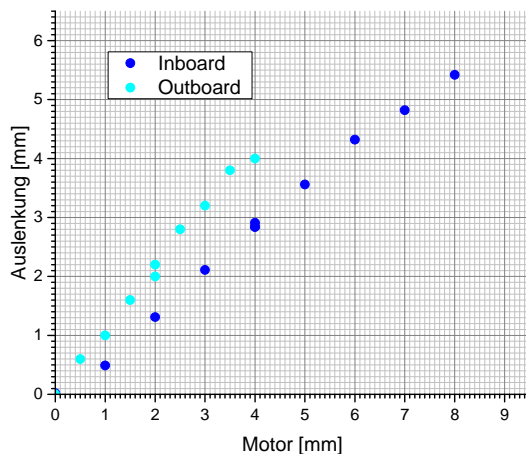


BILD 16: Absenkung der Droopnose über Motorverschiebung

4.1.3. Dehnungsmessung an Haut und Festkörperkinematiken

Während in Abschnitt 0 die Verformungen mit den Zielgeometrien verglichen werden, wird in diesem Abschnitt das Ergebnis einer FE Berechnung mit dem aus der Auslegung der Droopnose erzielten Aufbau betrachtet. Wie in [4,5] gezeigt sind die erreichbaren Verformungen der Droopnose geringer als die Zielgeometrien vorgeben.

In BILD 17 sind die gemessenen Dehnungen bei 100% Droop (rot) den entsprechenden Dehnungen aus der FE-Analyse (blau) für die Inboardkinematik gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass an allen Messstationen die Vorzeichen der Dehnung gut getroffen werden, während

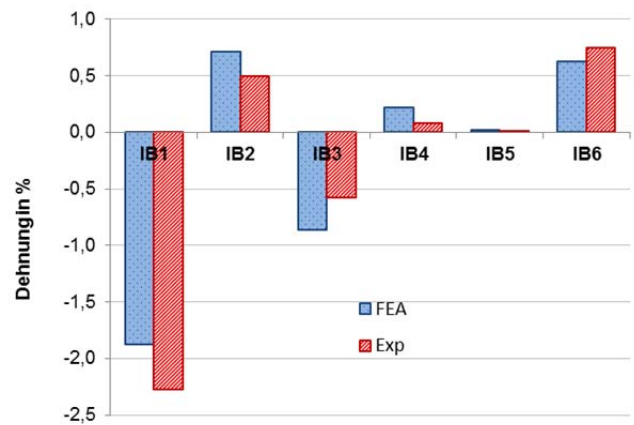


BILD 17: Dehnungen an Inboard-Festkörperkinematik bei 100% Droop, Vergleich zur FE Analyse

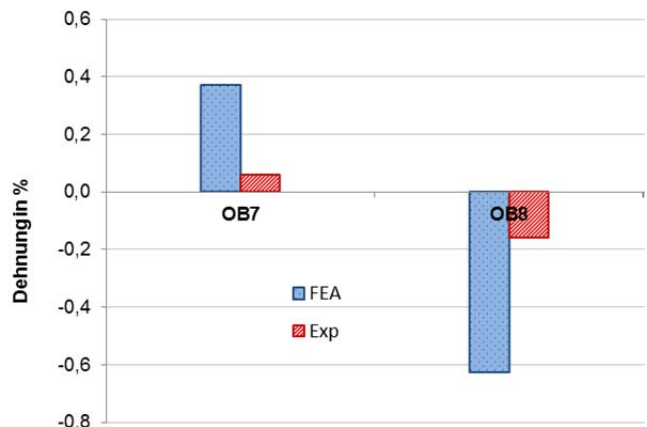


BILD 18: Dehnungen an Outboard-Festkörperkinematik bei 100% Droop, Vergleich zur FE Analyse

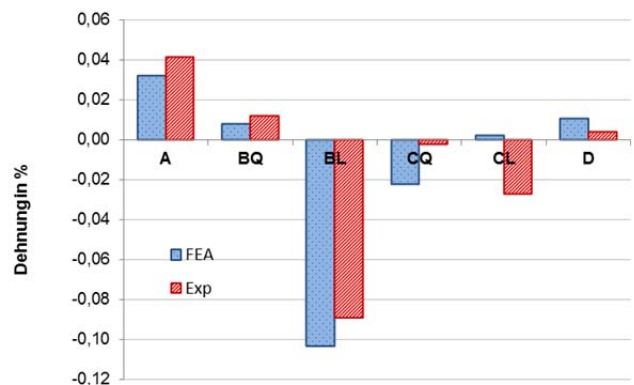


BILD 19: Dehnungen in der Haut bei 100% Droop, Vergleich zur FE Analyse

die Amplituden der Dehnung zum Teil über- und zum Teil unterschätzt werden. Insgesamt ist in Anbetracht des komplexen Gesamtsystems eine gute Übereinstimmung der FE-Analyse mit den Messungen festzustellen. Erwartungsgemäß ist die Dehnung an der Position IB1 am größten und mit einer Größenordnung von 2% auch in einem Bereich, der dauerhaft nur von dem superelastischen .NiTi getragen werden kann.

In BILD 18 sind entsprechend die Messungen an der Outboardkinematik dargestellt. Auch hier stimmen Rechnung und Messung bezüglich der Vorzeichen überein, jedoch wird die Amplitude durch die Rechnung deutlich überschätzt. Da sich die Positionen OB7 und OB8 gegenüberliegen, entspricht die Verformung einer Überlagerung von Längsdehnungen und einer Biegung in dem Kinematikelement. Dabei ist bei der Messung 69% der Gesamtdehnung Biegeanteil, während die Rechnung 80% Biegeanteil aufweist. Die auftretenden Dehnungen sind mit maximal 0,2% gut durch die Kinematik zu tragen.

Die Dehnungen in der Haut sind in BILD 19 aufgezeigt. Mit Ausnahme der Position CL sind erneut die Vorzeichen der Dehnung gut vorhergesagt. Die Amplituden werden von der Rechnung sowohl über- als auch unterschätzt, wesentliche Abweichungen sind bei der Anbindung der Outboardkinematik im Bereich CL und CQ zu beobachten, was aber gut mit den erhöhten Dehnungen in der Kinematik selbst korrespondiert.

Insgesamt wird die Vorhersage der Rechnung im Vergleich zu den gemessenen Werten, in Anbetracht des komplexen Systems zusammen mit den Abweichungen der Fertigung, als gut bewertet.

4.2. Abschließender Windkanalversuch

Im Windkanal werden Messungen mit dem Gesamtmodell durchgeführt, die eine Beobachtung und Bewertung der durch die Luftlasten auftretenden Verformungen ermöglichen. Zeitgleich aufgenommene aerodynamische Drücke und optische Verformungsbilder werden nicht im Rahmen dieser Veröffentlichung diskutiert, es wird auf [4,6] verwiesen.

BILD 20 und BILD 21 zeigen das in den Windkanal der Universität Bristol eingebaute Modell. Für die Messungen werden die folgenden Größen variiert:

- Anströmgeschwindigkeiten:
von 0 m/s bis 55 m/s in 5 m/s Schritten
- Droop:
0%, 50% und 100%
- Anstellwinkel:
-10° bis 10° in 5° Schritten

Aus der gemessenen Testmatrix werden ausgewählte Ergebnisse dargestellt, die die signifikanten Erkenntnisse widerspiegeln.

In BILD 26 sind die Ergebnisse für die Position IB1 bei 0° Anstellwinkel dargestellt. Von links nach rechts steigend sind die Dehnungen bei steigender Anströmgeschwindigkeit aufgetragen und in den Reihen farblich gekennzeichnet die Absenkung der Droopnose von 0% in Blau, 50% in Rot und 100% in Grün. Zu erkennen ist, dass die Dehnungen bei diesem Anstellwinkel fast ausschließlich vom Droop bestimmt werden, da die Dehnungsbeträge innerhalb des gleichen Droops um maximal $0,08 \cdot 10^{-2}$ m/m variieren, während sich die Beträge für die Droops bis zu $2 \cdot 10^{-2}$ m/m unterscheiden.

Vergleichend dazu sind in BILD 27 die Ergebnisse für die gleiche Position auf der Inboard-Festkörperkinematik bei -10° Anstellwinkel aufgezeigt, wobei hier die stärksten Änderungen der Luftlasten auftreten. Innerhalb eines Droops ist die maximale Abweichung $0,41 \cdot 10^{-2}$ m/m während die Differenz noch immer in der Größenordnung $2 \cdot 10^{-2}$ m/m liegt.

Für die in BILD 24 und BILD 25 gezeigten Dehnungen der Haut im Bereich der Krafteinleitung der Inboard-Festkörperkinematik ist ebenfalls der überwiegende Einfluss der Nasenabsenkung auf die Dehnungen zu erkennen.

Analog zu den bisherigen Messungen ist in BILD 26 für die Dehnung der Haut an der Profilspitze bei einem Anstellwinkel von 0° ein geringer Einfluss der aerodynamischen Lasten zu erkennen, dies ändert sich bei einem Anstellwinkel von -10° wie in BILD 27 gezeigt, wo die Dehnungsbeträge innerhalb eines Droops maximal um $0,07 \cdot 10^{-2}$ m/m differieren, während die unterschiedlichen Droopzustände nur maximal $0,05 \cdot 10^{-2}$ m/m abweichen. Dies entspricht durchaus den Erwartungen aus den Rechnungen.

Die mechanischen Messungen in dem Windkanal lassen sich so zusammenfassen, dass den Erwartungen entsprechende Ergebnisse erzielt werden konnten.

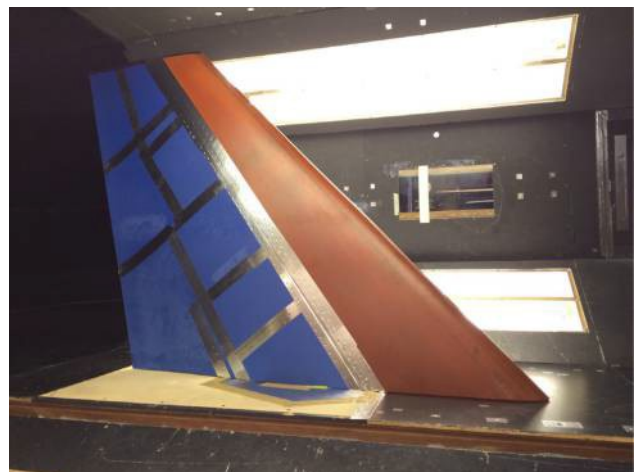


BILD 20: Einbau im Windkanal, Seitenansicht

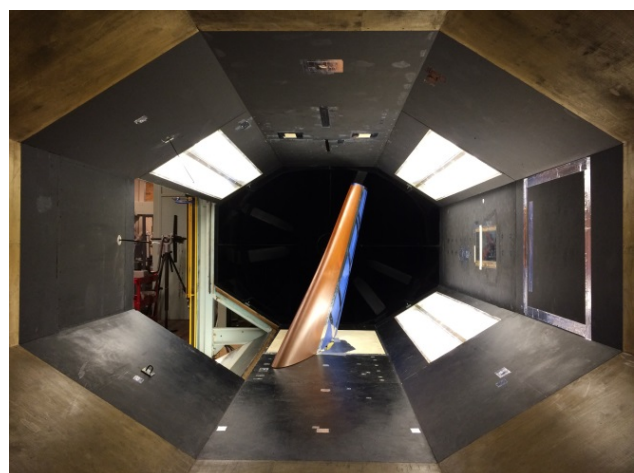


BILD 21: Einbau im Windkanal, Frontansicht

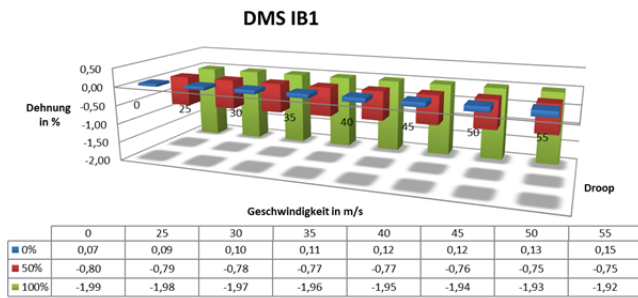


BILD 22: Dehnungen an Inboard-Festkörperkinematik bei 0° Anstellwinkel

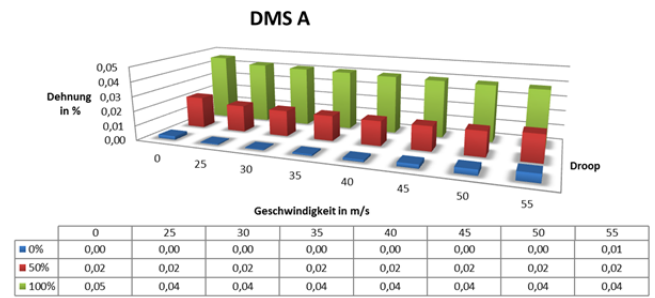


BILD 26: Dehnungen an Haut bei 0° Anstellwinkel, Profilspitze

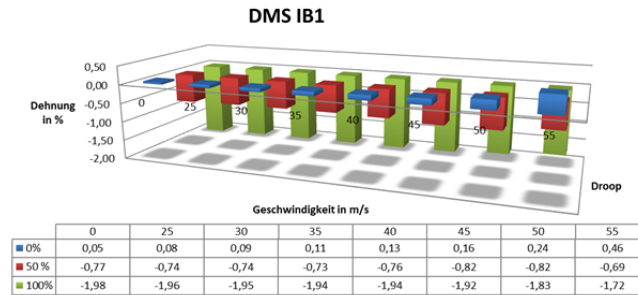


BILD 23: Dehnungen an Inboard-Festkörperkinematik bei -10° Anstellwinkel

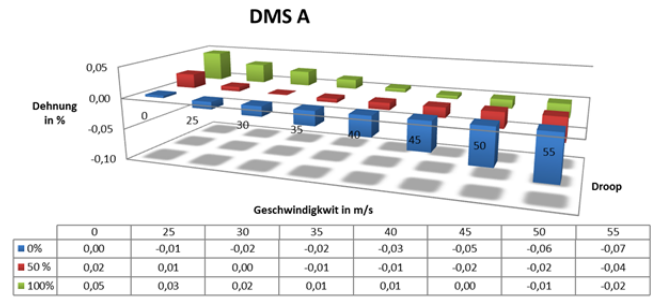


BILD 27: Dehnungen an Haut bei -10° Anstellwinkel, Profilspitze

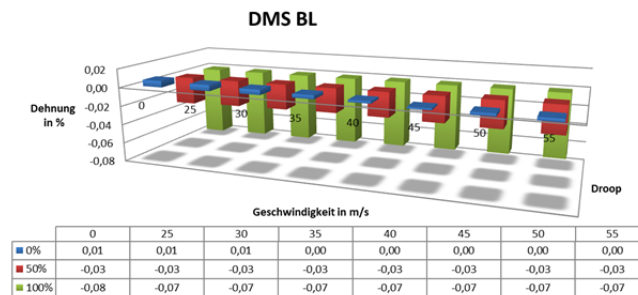


BILD 24: Dehnungen an Haut bei 0° Anstellwinkel, Anbindungspunkt Inboard-Kinematik

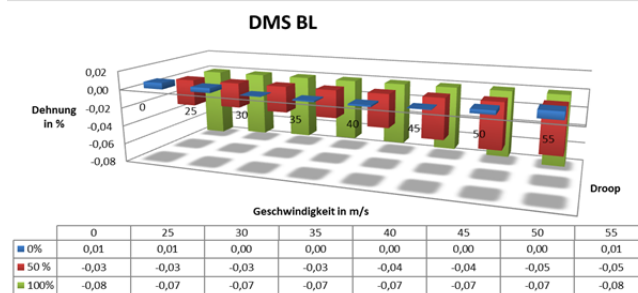


BILD 25: Dehnungen an Haut bei -10° Anstellwinkel, Anbindungspunkt Inboard-Kinematik

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die durchgeführten Versuche zeigen mit ihren Ergebnissen, dass die Struktur die aerodynamischen Lasten unter den gegebenen Windkanalbedingungen tragen konnte und dabei der überwiegende Dehnungsanteil durch das Morphing selbst generiert wird, nicht aus den äußeren Lasten.

Die insgesamt geringe Absenkung der Droopnose führt zu einer geringen Dehnung in der Haut mit maximal 0,08% während der Inboard-Mechanismus mit 2% Dehnung stark belastet wird. Dies weist auf ein Steifigkeitsungleichgewicht bei der Auslegung hin, die in weiteren Untersuchungen adressiert werden muss.

Zudem ist festzustellen, dass durch die sequentielle Auslegung die Hautoptimierung den Designraum für die folgende Topologieoptimierung schon soweit einschränkt, dass die ursprüngliche Zielgeometrie nicht erreicht wird. Diese Problematik ist für größere geforderte Verformungen mit hoher Wahrscheinlichkeit noch drängender, wodurch ein Designprozess mit gleichzeitiger Betrachtung aller Design-Parameter wünschenswert ist.

- [1] Vasista, S., De Gaspari, A., Ricci, S., Riemenschneider, J., Monner, H. P., and van de Kamp, B., "Compliant Structures-Based Wing and Wingtip Morphing Devices," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 88, No. 2, 2016, DOI: 10.1108/AEAT-02-2015-0067.
- [2] Kintscher, M., Wiedemann, M., Monner, H. P., Heintze, O., and Kühn, T., "Design of a Smart Leading Edge Device for Low Speed Wind Tunnel Tests in the European Project SADE," *International Journal of Structural Integrity*, Vol. 2, No. 4, 2011, pp. 383–405, DOI: 10.1108/17579861111183911.
- [3] Sigmund, O., "On the Design of Compliant Mechanisms Using Topology Optimization," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 25, No. 4, 1997, pp. 493–524, DOI: 10.1080/08905459708945415.
- [4] Vasista, S., Riemenschneider, J., van de Kamp, B., Monner, H. P., Cheung, R. C. M., Wales, C., and Cooper, J. E., "Evaluation of a Compliant Mechanism-Based Droop-Nose Morphing Wingtip via Experimental Tests," *Journal of Aircraft*, 2016 (in press).
- [5] Riemenschneider, J., Vasista, S., van de Kamp, B., and Monner, H. P., "Bench Top Test of a Droop Nose With Compliant Mechanism," *ASME 2015 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 2015, p. V002T04A004.
- [6] Vasista, S., Riemenschneider, J., van de Kamp, B., Monner, H. P., Cheung, R. C. M., Wales, C., and Cooper, J., "Lessons Learned from Wind Tunnel Testing of a Droop-Nose Morphing Wingtip," *SPIE Proceedings Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2016*, Vol. 9799, 2016, pp. 1–9, DOI: 10.1117/12.2219163.